竹胶板-薄壁钢管约束收尘石粉混凝土组合柱轴压性能

赵卫锋[1],罗宗健[1],周靖[2],黎亚军[1],补国斌[3]

(1. 湘潭大学土木工程与力学学院,411105 湘潭;2. 华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室,510641 广州;3. 湖南工业大学土木工程学院,412007 株洲)

摘　要: 提出一种新型的竹胶板-薄壁钢管复合约束收尘石粉混凝土组合柱(BSDCC),对10根BSDCC试件进行轴压试验,考察试件的破坏特点和形态,调查收尘石粉混凝土的含量率和强度、试件长细比、截面组合与拉杆约束方式、拉杆间距比对试件承载能力和变形的影响规律。结果表明,BSDCC试件的受压破坏形态主要为试件中部约束拉杆之间竹胶板的层间开胶剥离和材料压折破坏、竹胶板与钢管的开胶剥离破坏。相同条件下,收尘石粉混凝土含量率对试件的极限承载力无明显影响,对变形有重要影响,改变试件的破坏模式;混凝土强度、截面组合与拉杆约束方式对约束作用的影响大;承载力随着长细比、拉杆间距比增大而降低。通过回归分析建立了BSDCC的极限承载力计算模型。

关键词: 竹胶板;薄壁钢管;收尘石粉混凝土;组合柱;轴心抗压;极限承载力

中图分类号: TU318　　　　**文献标志码:** A

Axial compression performance of bamboo-plywood and thin-walled steel tube-encased dust-powder concrete composite column

ZHAO Weifeng[1], LUO Zongjian[1], ZHOU Jing[2], LI Yajun[1], BU Guobin[3]

(1. College of Civil Engineering and Mechanics, Xiangtan University, 411105 Xiangtan, China;
2. State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology, 510641 Guangzhou, China;
3. College of Civil Engineering, Hunan University of Technology, 412007 Zhuzhou, China)

Abstract: A new type of bamboo-plywood and thin-walled steel tube-encased dust-powder concrete composite column (BSDCC) was proposed. Ten BSDCC specimens were used to perform the axial compression test. The damage and failure mode were investigated, and the influences of dust-powder concrete (DPC) content ratio, concrete strength, slenderness ratio, restraint mode of sectional combination and binding-bars, and spacing ratio of binding-bars on the ultimate bearing capacity and deformation of specimens were analyzed. The results show that the compressive failure modes of BSDCC are mainly glue failure of the

收稿日期: 2020-09-29　　　**修回日期:** 2021-12-19

基金项目: 国家自然科学青年基金资助项目(No. 51708476;51708205);湖南省自然科学基金资助项目(No. 2020JJ4268);广州市科技计划资助项目(No. 201904010108);广东建设职业技术学院高层人才资助项目(No. GCC2021-01)

通信作者: 赵卫锋,副教授。E-mail:weifengzhjing@126.com

引用格式: 赵卫锋,罗宗健,周靖,等. 竹胶板-薄壁钢管约束收尘石粉混凝土组合柱轴压性能[J]. 应用力学学报,2022,39(1):137-147.
ZHAO Weifeng, LUO Zongjian, ZHOU Jing, et al. Axial compression performance of bamboo-plywood and thin-walled steel tube-encased dust-powder concrete composite column[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2022, 39(1): 137-147.

bamboo plywood and the thin-walled steel tube between the binding bars, and the material broken damage of the bamboo plywood in the middle of the specimen. The concrete content ratio has no significant effect on the ultimate bearing capacity, but has an important effect on the deformation under the same condition, which leads to the change of the failure mode of the specimen. The bearing capacity of specimens decreases with the increase of the slenderness ratio and the spacing ratio of the binding bars, and increases with the increasing concrete strength and the constraint of sectional combination and binding bars restraint mode on the bamboo plywood. A calculating model for the axial compression bearing-capacity of BSDCC is proposed through the regression analysis.

Key words: bamboo plywood; thin-walled steel tube; dust powder concrete (DPC); composite column; axial compression test; limit bearing capacity

重组竹和集成竹的成功研制拓宽了竹材在工程结构领域中的应用，近 10 年来，竹基或竹基复合结构构件成为竹材开发利用的新方向[1-3]。其中，以抗压承载为主的竹基工程结构柱的研究应用，从最早捆扎成束的原竹竿柱发展到竹管混凝土柱[4-5]、重组竹胶合柱[6]、胶合竹(木)组合柱[7]、竹胶板/型钢组合柱[8-9]等。研究表明通过合理地组合设计，竹材或竹胶板在工程结构领域有广阔的应用前景。

我国工程建设飞速发展，混凝土年消耗约 18 亿立方米，占全世界的 50%。如此大体量的混凝土，在开采、破碎小颗粒卵石和砂石过程中产出了大量的石粉尘废弃物(直径小于 75 μm 的固体悬浮物)。据初步统计，每年回收约 3 000 万吨的石粉尘废弃物(简称收尘石粉)。空气中的石粉尘是 PM2.5 的主要污染源，由于细度接近泥粉，通常需填埋处理。收尘石粉的填埋占用土地，且污染水土环境，严重危害生态环境。收尘石粉废弃物的高效科学处理已成为制约可持续发展的世界性难题，目前收尘石粉的应用研究极少。文献[10-11]研究掺入石粉尘的自密实混凝土的力学性能；Kandolkar 等[12]将回收石粉尘作为掺合料应用于竹筋或钢筋水泥墙中；Singh 等[13]研究收尘石粉替代部分砂石制作的混凝土块体的耐久性；Febin 等[14]研究掺入石粉尘水泥砌块的强度和耐久性；霍曼琳等[15]研究石粉尘掺入量对混凝土工作性和抗压强度的影响。

本文在竹胶板-薄壁钢管组合空芯柱研究[8-9]的基础上，集成开发利用竹胶板和收尘石粉废弃物，将含收尘石粉的低强度混凝土灌入组合空芯柱内，改进设计出一种新型竹胶板-薄壁钢管复合约束收尘石粉混凝土组合柱(BSDCC)。新型组合柱采用竹胶板与薄壁钢管双重约束收尘石粉混凝土的截面构型，其中薄壁钢管不仅起内衬作用，还能作为收尘石粉混凝土与竹胶板间的隔水层，降低竹胶板的吸水性，增强胶合竹板的耐久性；同时与横向约束钢拉杆组合能形成很好的套箍作用，增加横向约束力，提高组合构件的整体性。产品契合废弃物循环利用和可再生绿色建筑材料开发利用的资源战略需求，具有重要的社会经济效益意义。本文对 10 根 BSDCC 试件进行轴压试验，考察其破坏特点和形态，调查试件承载能力和变形的影响情况，构建承载力估算模型，为工程应用提供参考。

1 试验概况

1.1 试件设计和制作

设计 10 根截面尺寸($B \times B$)均为 140 mm × 140 mm的 BSDCC 试件，参数如表 1 所示，截面组合及拉杆约束方式如图 1 所示，试件构型示意如图 2 所示。试件 AC-1，AC-2 和 AC-3 相比较，考察收尘石粉混凝土(DPC)和竹胶板的截面含量率的影响；试件 AC-2，AC-4 和 AC-5 相比较，考察长细比(λ)的影响；试件 AC-4，AC-6 和 AC-7 相比较，考察截面组合与拉杆约束方式的影响；试件 AC-5，AC-8 和 AC-9 比较，考察拉杆间距比(r_1)的影响；试件 AC-6 和 AC-10 比较，考察 DPC 强度的影响。

试件长细比(λ)、DPC 含量率(ρ)、约束拉杆间距比 r_1的计算式为

$$\lambda = \frac{L}{B} \tag{1}$$

$$\rho = \frac{A_c}{A} \tag{2}$$

$$r_1 = \frac{s}{B} \tag{3}$$

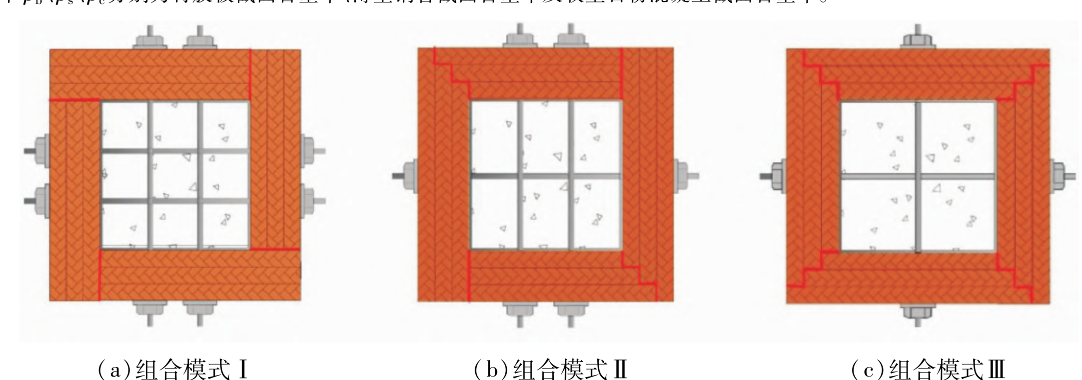
式中：L 为试件长度；B 为截面边长；A 为试件截面面积；A_c 为 DPC 截面面积；s 为约束拉杆间距。

表 1　试件参数

Tab. 1　Parameters of specimens

试件编号	λ	DPC 强度/MPa	组合模式	钢管截面 $B\times B\times t$/mm	竹胶板层数	r_1	ρ_b/%	ρ_s/%	ρ_c/%	L/mm
AC-1	8	6.0	Ⅰ	60×60×2	4	2.0	81.6	1.2	17.2	1 120
AC-2	8	6.0	Ⅰ	80×80×2	3	2.0	67.3	1.6	31.1	1 120
AC-3	8	6.0	Ⅰ	100×100×2	2	2.0	49.0	2.0	49.0	1 120
AC-4	12	6.0	Ⅰ	80×80×2	3	2.0	67.3	1.6	31.1	1 680
AC-5	16	6.0	Ⅰ	80×80×2	3	2.0	67.3	1.6	31.1	2 240
AC-6	12	6.0	Ⅱ	80×80×2	3	2.0	67.3	1.6	31.1	1 680
AC-7	12	6.0	Ⅲ	80×80×2	3	2.0	67.3	1.6	31.1	1 680
AC-8	16	6.0	Ⅰ	80×80×2	3	1.0	67.3	1.6	31.1	2 240
AC-9	16	6.0	Ⅰ	80×80×2	3	3.0	67.3	1.6	31.1	2 240
AC-10	12	9.8	Ⅱ	80×80×2	3	2.0	67.3	1.6	31.1	1 680

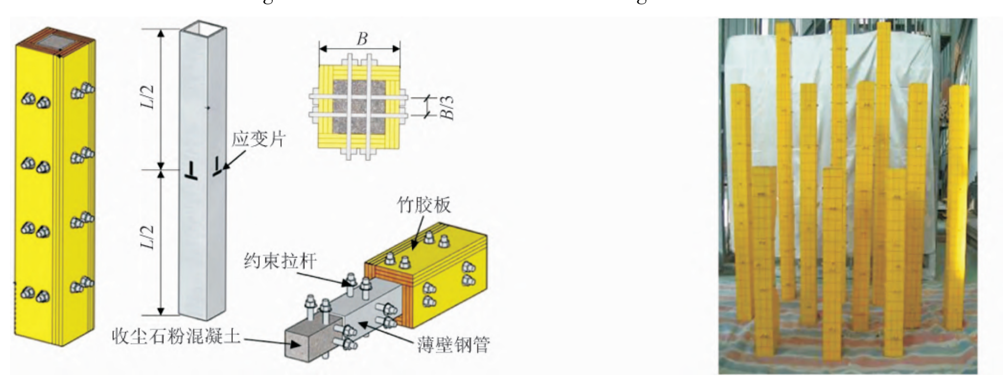
注：表中 ρ_b、ρ_s、ρ_c 分别为竹胶板截面含量率、薄壁钢管截面含量率及收尘石粉混凝土截面含量率。



(a)组合模式Ⅰ　(b)组合模式Ⅱ　(c)组合模式Ⅲ

图 1　截面组合和拉杆约束方式

Fig. 1　Sectional combination and binding-bar restraint



(a) BSDCC 组成　(b)试件成品

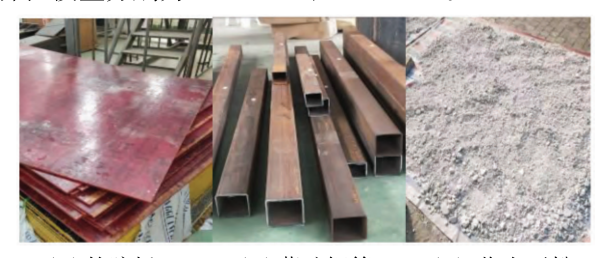
图 2　BSDCC 试件示意

Fig. 2　Schematic diagram of BSDCC

1.2　材料性能

采用规格为 2 440 mm×1 220 mm×10 mm(长×宽×厚)的同批次毛竹竹席胶合板(图 3a)，含水率为 9%，横向和纵向的静曲强度分别为 52 MPa 和 83 MPa，横向和纵向的弹性模量分别为 7.4 GPa 和 8.3 GPa，纵向抗压强度为 24 MPa。薄壁钢管为厚 2 mm的无缝方形钢管(图 3b)，约束拉杆采用 M8 全螺纹拉杆。依据 GB/T 228.1 标准[16]进行薄壁钢管和拉杆的性能测试，如表 2 所示。界面黏结剂采用奥斯邦 EP120 环氧树脂 AB 胶，收缩率小于 1%，抗拉强度大于 10 MPa，抗剪切强度大于 12 MPa。石粉尘由佛山陶瓷厂提供，晾干水分作为掺合料使用(图 3c)。将石粉尘作为胶凝材料按一定比例掺入到混凝土，配制成含收尘石粉的低强度混凝土(DPC)[15]，依据 GB/T 50081 标准[17]进行立方体单轴抗压强度测试，

计算得到 DPC 抗压强度分别为 9.0 MPa 和 14.2 MPa，弹性模量分别为 16.4 GPa 和 21.7 GPa。



(a) 竹胶板　　(b) 薄壁钢管　　(c) 收尘石粉

图 3　主要材料

Fig. 3　Main materials

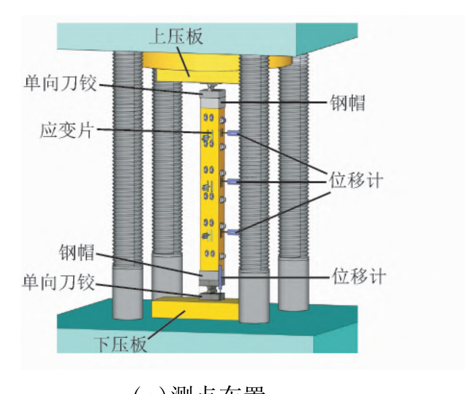
表 2　钢管和拉杆的力学性能

Tab. 2　Mechanical properties of steel tube and binding bars

材料	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	弹性模量/GPa
薄壁钢管	350	425	190
约束拉杆	260	412	193

1.3　试验方法

采用 15 MN 长柱试验机加载，试验装置和测点布置如图 4 所示。试件两端通过单向刀铰传递竖向载荷，柱端面与刀铰板之间设钢帽（深 40 mm）约束柱端的竹胶板，钢帽内涂抹薄层高强石膏找平。试件纵向变形由设置在试验机压板上的位移计测量，试件相邻两侧面的上、中、下部设 6 个测量侧向变形的水平位移计。由布置在钢管和竹胶板相邻两侧面的应变片测量钢管和竹胶板的横向和竖向应变。测试荷载、位移、应变由静态数采系统自动采集。正式加载前对试件进行预压调整和铅垂度校正。采用位移加载方式慢速均匀加载，当试件出现较大开裂破坏或变形迅速增长时终止试验，取峰值荷载作为试件的极限承载力。



(a) 测点布置　　(b) 试验装置

图 4　加载试验装置

Fig. 4　Schematic diagram of load test setup

2　试验结果和分析

2.1　试验现象和破坏特征

所有试件的破坏过程均表现出相似的力学行为，破坏形态因设计参数不同有不同的特点。加载初期，试件基本处于弹性工作状态；当加载达到极限荷载的 50% ~ 60% 时，有间歇短促细小开裂声，约束拉杆之间的竹胶板出现细微裂缝，此为竹胶板之间的剪应力和法向拉应力超过胶合强度出现的开胶；当荷载达到极限荷载的 70% 左右，试件出现较大的开裂破坏声，原有裂缝逐渐发展，局部竹胶板向外鼓曲，轴向压缩变形增大，此时约束拉杆张拉趋紧，拉杆附近的竹胶板保持完好；接近峰值荷载时，裂缝迅速发展且向约束拉杆靠近，破裂声较大，部分试件中部约束拉杆之间竹胶板完全剥离鼓曲并压折破坏。破坏区域竹胶板基本退出工作，由钢管约束 DPC 芯柱独立承载，钢管混凝土截面尺寸小、抗侧刚度有限，柱中部侧向挠度迅速增长，丧失竖向承载能力而整体失效。

试件的约束拉杆受力保持良好，没有发生明显的剪切变形或破坏。约束拉杆与内部钢管收尘石粉混凝土芯柱形成了套箍效应，起到抑制竹胶板开胶发展的作用，加强各基体之间的变形协调，提高了组合柱的装配整体性。试件破坏形态如图 5 所示，以试件 AC-3 为例的破坏过程如图 6 所示。

根据试验现象，试件的破坏形态（见图 7）有不同程度的差异，主要分为 3 种形式：试件中部约束拉杆之间竹胶板与钢管开胶剥离破坏、竹胶板与竹胶板之间的开胶破坏、竹胶板的材料压折破坏。综合来看，截面组合模式Ⅱ和Ⅲ剥离破坏比模式Ⅰ严重；

剥离程度随约束拉杆间距比的增大而增大;DPC 强度对试件破坏形态的影响较小。竹胶板压折破坏区域,相应部位的钢管出现局部屈曲(如图 7c 所示)。典型的受压破坏形态如下。

1)竹胶板单侧压折破坏。如长细比相对较大的试件 AC-5、AC-8 和 AC-9,由于不可避免的材料非均匀性,承压面与试件轴线并非绝对垂直,轴压过程中在薄弱侧会出现挠曲二阶效应而产生附加弯矩,导致截面受压不均,在压应力较大侧发生竹胶板压折破坏。

2)竹胶板腰鼓状压折破坏。如长细比相对较小的试件 AC-1、AC-2 和 AC-3,挠曲二阶效应相对较弱,加载过程中基本处于轴压状态,截面受力相对均匀,轴压荷载接近极限承载力时,芯柱四侧竹胶板基本达到极限强度,从而出现腰鼓状压折破坏,材料强度得到充分发挥。

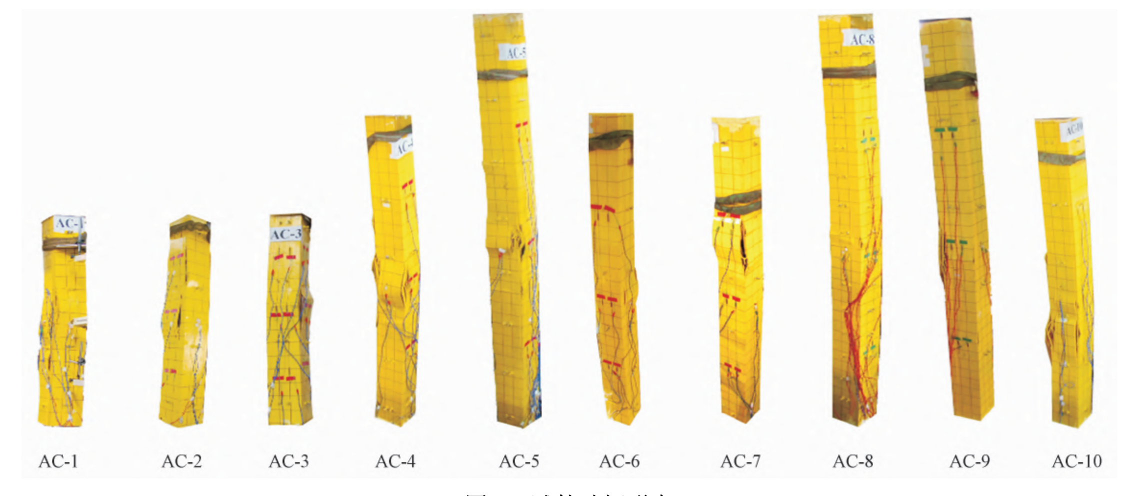


图 5　试件破坏形态

Fig. 5　Failure mode of all specimens

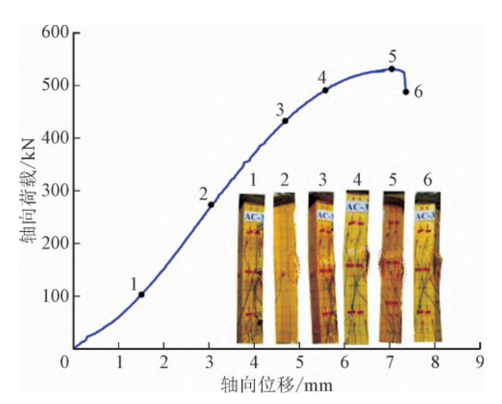


图 6　试件 AC-3 破坏过程

Fig. 6　Damage process of specimen AC-3

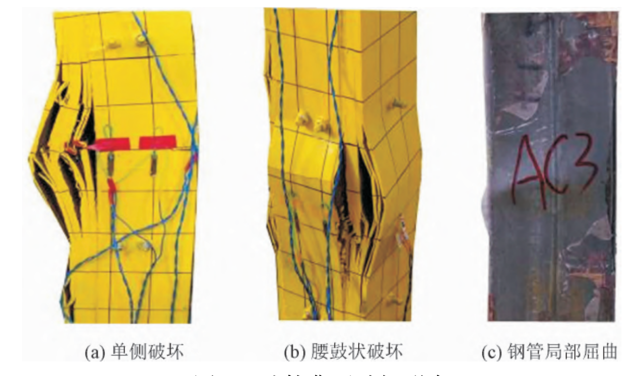


图 7　试件典型破坏形态

Fig. 7　Typical failure mode of specimens

2.2　荷载-位移/应变

2.2.1　截面材料含量率的影响

图 8 为不同 DPC 和竹胶板含量率试件 AC-1,AC-2 和 AC-3 的荷载-位移/轴压应变曲线比较。3 个试件的横截面尺寸相同,但 DPC、竹胶板和钢管的净截面面积不同,如表 1 所示。3 个试件的极限承载力相差很小(承载力比为 1:1.03:1.01),但轴向和侧向变形有较大差异。试件 AC-1 的 DPC 净截面比小(17.2%),而竹胶板净截面比大(81.6%)。DPC 比竹胶板的抗压和抗弯刚度大,因此试件 AC-1 整体的轴向和侧向刚度小,轴向和侧向变形大。试件 AC-2 比试件 AC-3 的轴向和侧向变形稍大,表明两者综合的轴向和侧向刚度相当。试件 AC-3 的 DPC 净截面比大,能消纳更多的收尘石粉废弃物,但承载力有减小的趋势。峰值荷载前,3 个试件的竹胶板竖向应变基本相同,而峰值荷载后试件 AC-2 的竹胶板竖向应变发展最充分,表明竹材强度得到充分发挥。整体上,截面材料含量率对试件抗压性能有重要影响,调控各组份的比例能够得到优化的刚度和承载力,最大限度利用材料的强度。

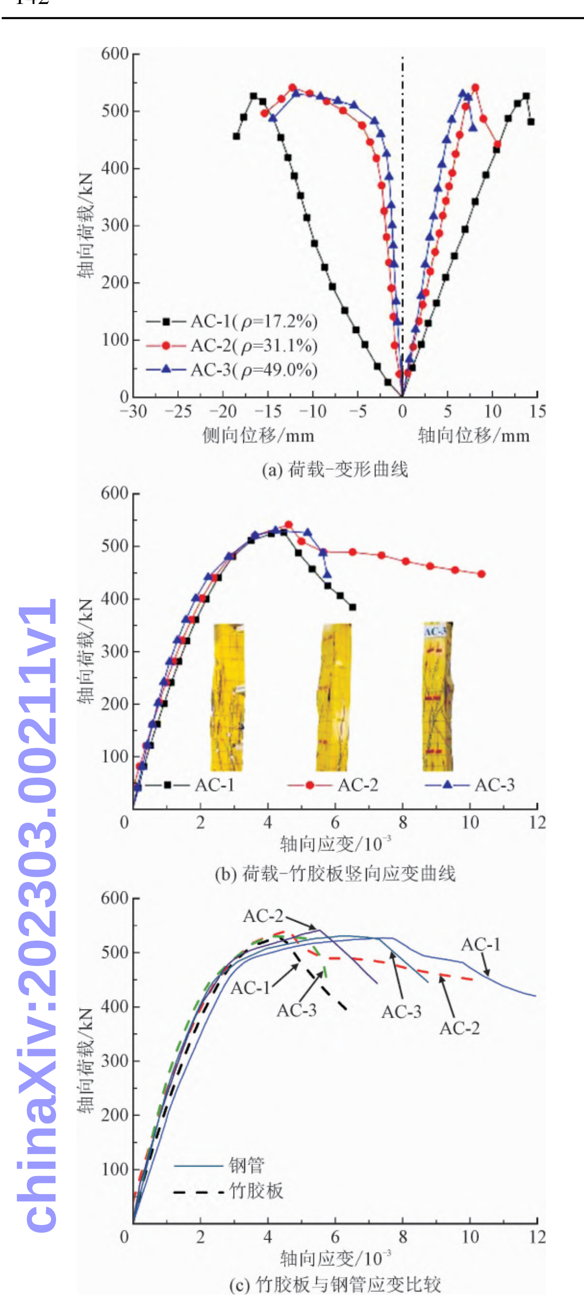


图 8　截面材料含量率的影响

Fig. 8　Influence of material content ratio

2.2.2　DPC 强度的影响

图 9 为不同 DPC 强度试件 AC-6 和 AC-10 的荷载-位移/轴压应变曲线比较，试件的 DPC 强度 f_c 分别为 6.0 MPa 和 9.8 MPa。两个试件的轴向和侧向变形相差不大，但试件 AC-10 的承载力明显较大（承载力比为 1∶1.14），表明 DPC 强度高的试件具有较大的承载力。试件 AC-10 的 DPC 弹性模量大，在弹性变形阶段，同等轴压水平下应变发展慢，竹胶板的开胶剥离破坏延迟，因此表现出更高的极限承载力。试件 AC-6 的竹胶板竖向应变发展更充分，表明 AC-6 的竹胶板材料强度得到充分发挥，承担竖向荷载比例大。由图 9（c）可知，在竹胶板退出工作以后，由钢管约束 DPC 芯柱独立承载。由于考虑 DPC 强度影响的试件只有 2 根，考察 DPC 强度对组合柱的变形协调性和承载力的影响趋势，尚需更多的试验研究和数值模拟分析。

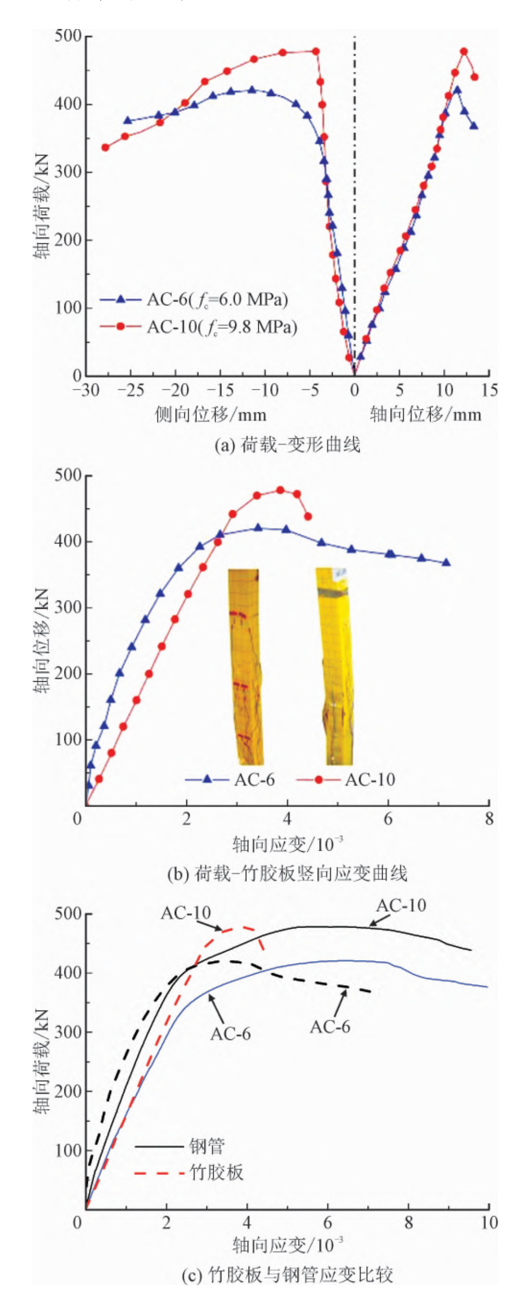


图 9　DPC 强度的影响

Fig. 9　Influence of DPC strength

2.2.3　长细比的影响

图 10 为不同长细比（λ）试件 AC-2，AC-4 和 AC-5 的荷载-位移/轴压应变曲线比较。λ 对试件的抗压极限承载力和变形有重要影响，基本符合 λ 小，

极限承载力大,竖向和侧向变形小的规律。3 个试件的截面尺寸和材料构成比例相同,轴向抗压刚度相同,但 λ 小的试件相对压缩变形量小($\Delta L = NL/EA$,轴压变形只与试件长度相关,其中 N 为轴压力,EA 为试件轴压刚度),且 λ 小的试件竹胶板轴压极限应变更大,表明材料强度的利用更加充分。如试件 AC-2($\lambda=8$)的轴压变形小,极限压应变明显大于试件 AC-5($\lambda=16$)。根据欧拉原理,λ 大的试件 AC-5($\lambda=16$),极限承载力小,线弹性段较短,轴压稳定性降低,也容易出现挠曲二阶效应,侧向变形增大。试件 AC-2,AC-4 和 AC-5 承载力比为1:0.81:0.73,随着 λ 增大,承载力呈现降低的趋势。试件 AC-4($\lambda=12$)的侧向变形最大,可能是因竹胶板局部初始缺陷,较早发生了挠曲二阶效应。从图 10(c)的竹胶板、钢管竖向应变曲线可看出,AC-4 的竹胶板竖向发展较快,且与钢管应变的同步性较低,初始段即与其他 2 个试件有差异,应变曲线峰值荷载前的弹塑性段较长。

2.2.4 截面组合与拉杆约束方式的影响

图 11 为不同截面组合与拉杆约束方式试件 AC-4,AC-6 和 AC-7 的荷载-位移/轴压应变曲线比较。由图 11(a)可知,试件 AC-7(模式Ⅲ)具有最大的承载力,试件 AC-4(模式Ⅰ)和试件 AC-6(模式Ⅱ)基本相当,极限承载力之比为 1:0.96:1.11。这表明竹胶板采用层层交错卡扣的组合方式和增加横向约束拉杆数量的方式均可以改善试件截面的装配组合效果,提高试件的抗压承载能力。装配组合效果与竹胶板胶合界面内外环扣作用、拉杆约束能力密切相关。假定图 1 试件横截面上单片竹胶板的厚度为 b,试件 AC-7(模式Ⅲ)端部胶合界面长为 $20b$,层层交错卡扣的外部竹胶板抑制内部竹胶板的开胶破坏。试件 AC-4(模式Ⅰ)端部胶合界面长为 $12b$,端部无交错卡扣约束,但截面的双向都比试件 AC-7(模式Ⅲ)多一根拉杆,通过约束拉杆与核心区钢管混凝土芯柱形成横向箍筋作用产生套箍效应,实现相同的装配组合效果。试件 AC-6(模式Ⅱ)是试件 AC-4 和试件 AC-7 的组合构型,很明显达到了较好的装配组合效果。试件 AC-7 的竹胶板竖向应变发展较短,间接表明内层竹胶板、钢管和 DPC 发挥较大的作用。对比钢管和竹胶板的应变协调性可知,双向均设 2 道拉杆的组合模式Ⅰ(试件 AC-4)的材料协同性更好。

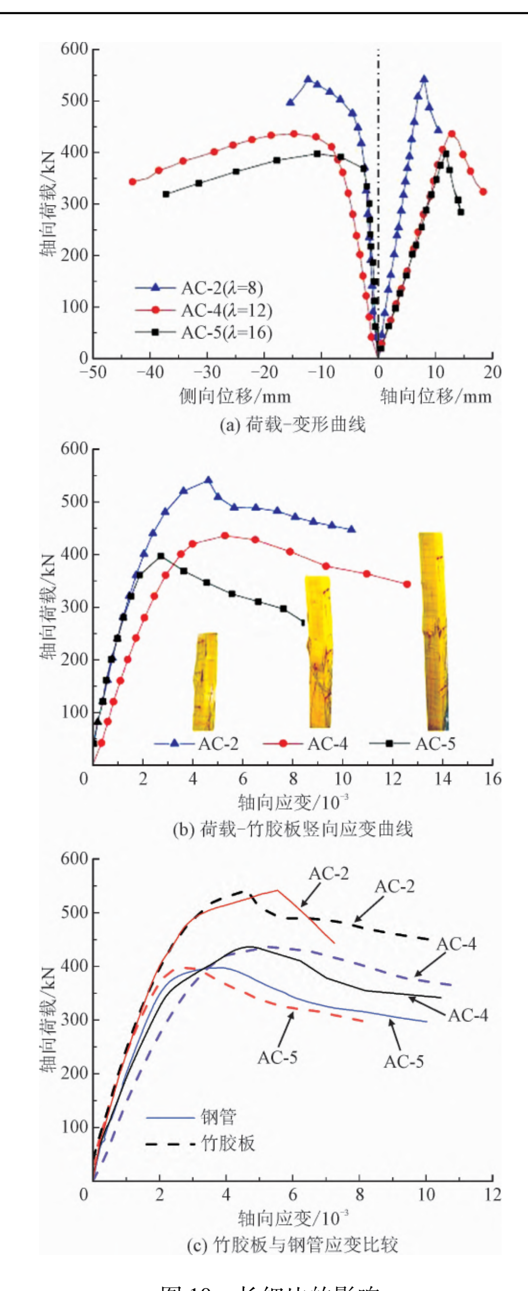


图 10 长细比的影响

Fig. 10 Influence of slenderness ratio

2.2.5 拉杆间距比的影响

图 12 为不同拉杆间距比(r_1)试件 AC-5,AC-8 和 AC-9 的荷载-位移/轴压应变曲线比较,r_1依次为 2、1 和 3,极限承载力之比为 1:0.89:0.94。可以看出,试件 AC-5 的极限承载力最大。r_1的直接影响体现在局部开胶破坏,拉杆间距的合理布置,能有效提高钢管与竹胶板的局部屈曲强度,通过约束钢管与竹胶板的侧向变形,改变试件破坏形态提高承载力。比较 3 个试件的破坏形态可知,增大 r_1,试件的局部开裂破坏显著增大。对 r_1较小的试件,约束拉杆与钢管协同作用形成套箍效应,能有效抑制竹胶板的

局部开胶剥离，增强试件组合整体性；同时提高竹胶板与钢管的变形和应变协同性，改变抗压破坏模式，从而提高试件的抗压和变形能力。如图 12(c) 所示，r_1较小的试件 AC-8，竹胶板和钢管的竖向应变同步性较好，表明两种材料能整体协同工作；而试件 AC-9 在加载初期，竹胶板与钢管应变相差较小，随着轴向荷载的进一步增大，两种材料的竖向应变相差较大，导致试件的轴向刚度不断减小，且两种材料的极限应变明显低于 AC-5 和 AC-8，材料强度未得到充分发挥。

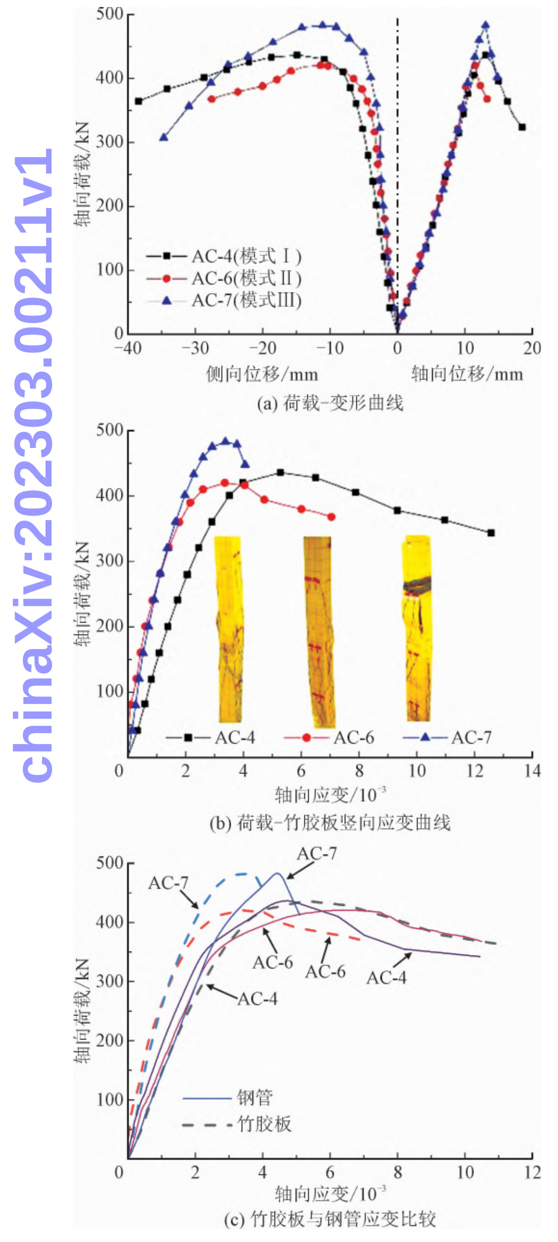


图 11　截面组合与拉杆约束方式的影响

Fig. 11　Influence of sectional combination and binding bars restraint mode

试件 AC-8 的局部开胶破坏出现较晚，竹胶板轴压应变发展很充分，但其承载力与试件 AC-9 相差不大，可能是试件制作的材料和安装过程出现的偏差所致，具体有待进一步研究。从产品制造的工艺上考虑，并非 r_1 越小越有利，$r_1=2$ 是合理可行的方案。

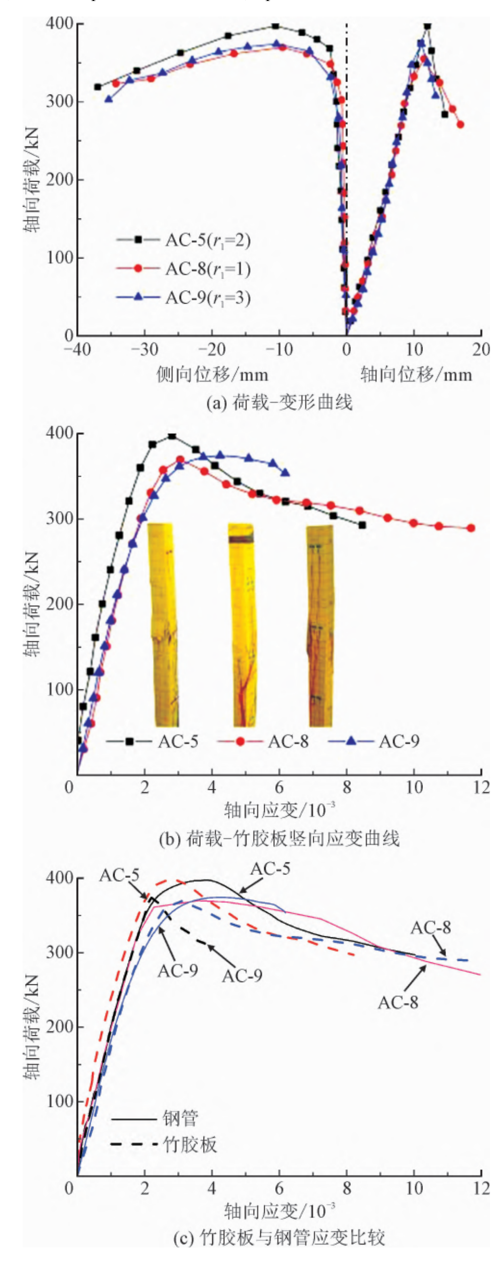


图 12　拉杆间距比的影响

Fig. 12　Influence of spacing ratio of binding bars

3　特征点和延性

表 3 为轴压荷载-变形曲线上的特征点和轴压变形延性系数。在曲线上升段上，按等效能量法(图 13)确定屈服荷载(N_y)和屈服位移(Δ_y)；在曲线下降段，取荷载下降至峰值荷载的 85% 时所对应位移

为极限位移(Δ_u)。定义轴压变形延性系数为

$$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \tag{4}$$

竹材是一种弹性变形能力强的材料,而弹塑性或塑性变形行为不具优势。本文研究的 BSDCC,竹胶板在截面中占比较大,DPC 比普通混凝土的弹性模量小,因此整体上 BSDCC 试件维持了与竹材相似的力学行为。如表 3 所示,试件轴压屈服位移率(Δ_y/L)比其他混凝土组合柱大[18],而轴压塑性位移率($\Delta_u-\Delta_y$)$/L$ 不大,特别是峰值荷载后承载能力迅速衰减,塑性变形发展段很短。这表明塑性变形行为不具优势,属于脆性破坏,整体上轴压变形延性系数偏小。可以在后续研究中优化截面设计构型,以提高极限承载力和塑性变形的综合性能。

表 3 特征点与延性

Tab. 3 The feature points and ductility of specimens

试件编号	N_y/kN	Δ_y/mm	(Δ_y/L)/%	N_u/kN	Δ_u/mm	[($\Delta_u-\Delta_y$)/L]/%	μ
AC-1	499.12	12.62	1.13	527.00	14.30	0.15	1.13
AC-2	526.29	7.64	0.68	541.40	9.81	0.19	1.28
AC-3	503.12	5.97	0.53	530.60	7.56	0.14	1.27
AC-4	482.78	12.61	0.75	436.08	16.17	0.21	1.28
AC-5	396.47	11.96	0.53	397.40	13.30	0.06	1.11
AC-6	413.62	11.64	0.69	420.25	13.29	0.10	1.14
AC-7	460.48	13.44	0.80	482.82	14.61	0.07	1.10
AC-8	350.28	11.23	0.50	369.60	15.60	0.20	1.39
AC-9	350.28	11.23	0.50	374.10	12.80	0.07	1.14
AC-10	466.55	12.66	0.75	477.80	13.40	0.03	1.06

为进一步探讨拉杆约束方式以及内置 DPC 对试件轴压承载能力的影响,将本批试件的极限压应力与设置单排约束拉杆竹胶板-薄壁钢管空芯组合柱(SBCCB)[9]的极限压应力进行比较,结果如图 14 所示。可以看出,SBCCB 的平均极限压应力为 20.29 MPa,而 BSDCC 的平均极限压应力为 23.23 MPa,相对于约束拉杆空芯组合柱 SBCCB 的极限压应力提高了 14.5%。填充低强度的 DPC,可以使试件的平均压应力明显增大。这表明 BSDCC 试件产生了较好的耦合作用,改变了试件的破坏模式,竹胶板材料强度得到了充分地发挥,为新型组合柱的优势所在。

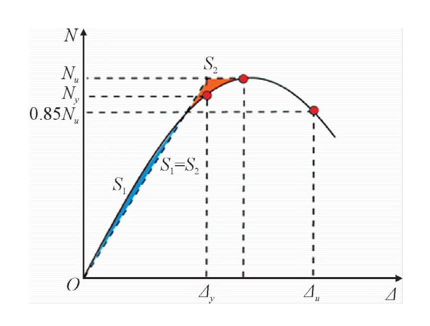


图 13 等效能量法

Fig. 13 Equivalent energy method

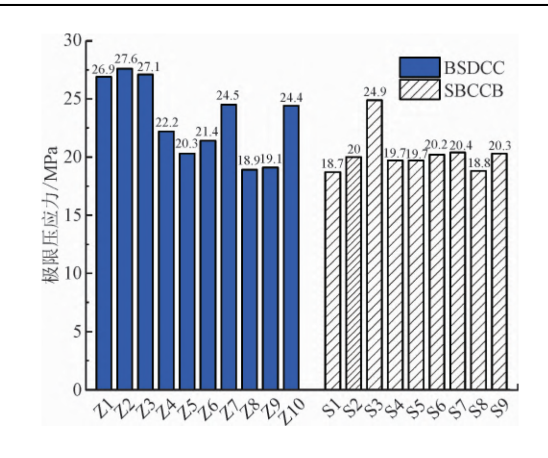


图 14 极限压应力的比较

Fig. 14 Comparison of ultimate compressive stress

4 轴压承载力估算模型

BSDCC 的极限承载力受多种因素影响,且具有偶然变异性,但整体上有规律可循。BSDCC 的轴压承载力不仅与长细比、DPC 强度、截面材料含量率等因素有关,还受截面组合模式的影响。由前述分析可知,截面组合模式Ⅰ与模式Ⅱ的极限承载力相差不大,组合模式Ⅲ相对较高,而综合考虑承载力与加

工制造的因素，建议采用截面组合模式Ⅰ，不考虑组合方式的影响。参考《木结构设计标准》[19]，依据叠加原理，建立极限承载力计算模型。轴压稳定系数(φ)分解为长细比影响系数(φ_λ)和约束拉杆影响系数(φ_r)的乘积，构造承载力计算模型，即

$$N_u = \varphi_\lambda \varphi_r (f_b A_b + f_s A_s + f_c A_c) \tag{5}$$

$$\varphi_\lambda = \frac{1}{1 + (\lambda / \alpha_1)^2} \tag{6}$$

$$\varphi_r = 1 + \frac{\alpha_2 r_2}{r_1} \tag{7}$$

式中：竹胶板纵向抗压度 $f_b = 24$ MPa；钢管屈服强度 $f_s = 350$ MPa；DPC 抗压强度 $f_c = 9$ MPa；A_b 为竹胶板净截面面积；A_s 为钢管净截面面积；A_c 为 DPC 净截面面积；r_1、r_2 分别为约束拉杆的相对间距比与排数；α_1、α_2 为拟合参数。通过非线性回归分析，得到简化参数 $\alpha_1 = 20$，$\alpha_2 = 0.11$，整体相关系数 $R^2 = 0.89$。

承载力计算式适用于 $8 < \lambda < 16$，且截面组合与拉杆约束方式为模式Ⅰ的 BSDCC 轴压承载力计算。轴压承载力计算值与试验值对比如表 4 所示，得到试验值与计算值之比的平均值为 0.93，表明两者吻合良好。各材料的承载力占比如图 15 所示。可以看出：竹胶板截面含量比大，承载力分担比例最高；钢管截面含量比小，但钢材强度高，承载力分担比例较高；DPC 截面含量比相对大，但 DPC 材料强度低，承载力分担比例最低，DPC 的作用主要体现在改变试件受力破坏模式，提高抗压稳定性和变形等方面。比较可知，通过进一步优化 DPC 的截面含量或适当提高 DPC 强度，有望获得新型组合柱更优化的抗压承载力和变形能力综合效果。

表 4　试验值与计算值比较

Tab. 4　Comparison of test values and predicted values

试件编号	N_{u1}/kN	N_{u2}/kN	N_{u1}/N_{u2}
AC-1	527	554.7	0.95
AC-2	541.4	566.8	0.96
AC-3	530.6	567.3	0.94
AC-4	436.08	486.9	0.90
AC-5	397.4	401.4	0.99
AC-8	369.6	441.0	0.84
AC-9	374.1	397.7	0.94

注：N_{u1}、N_{u2} 分别为试验值与计算值

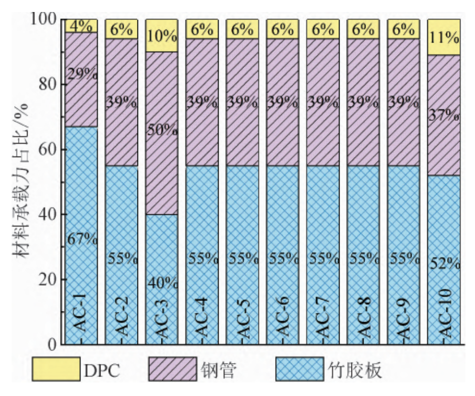


图 15　承载力占比

Fig. 15　Proportion of bearing capacity

5　结　论

通过对竹胶板-薄壁钢管复合约束收尘石粉组合柱(BSDCC)轴压性能研究，得出以下结论。

1) 新型 BSDCC 的轴心抗压破坏模式主要为试件中部约束拉杆之间竹胶板的开胶剥离破坏和竹胶板的材料压折破坏，竹胶板压折破坏区域的钢管出现局部屈曲。

2) BSDCC 的极限承载力随着长细比、拉杆间距比的增大而降低，随 DPC 强度提高而增大；截面组合模式对竹胶板约束越强，极限承载能力越高；在本批试件中，DPC 截面含量率对 BSDCC 的极限承载力无显著影响。

3) 内置的低强度 DPC 可以与钢管和约束拉杆相互作用，提高 BSDCC 试件的抗压刚度和稳定性，从而改变组合柱的轴压破坏模式和变形能力。

4) 根据试验结果提出了轴向受压极限承载力计算模型，与试验结果吻合良好，计算模型可为工程应用提供参考。

参考文献

[1] 肖岩，杨瑞珍，单波，等. 结构用胶合竹力学性能试验研究[J]. 建筑结构学报，2012，33(11)：150-157.(XIAO Yan, YANG Ruizhen, SHAN Bo, et al. Experimental research on mechanical properties of glubam[J]. Journal of building structures, 2012, 33(11): 150-157 (in Chinese)).

[2] SHARMA B, GATÓO A, BOCK M, et al. Engineered bamboo for structural applications[J]. Construction and building materials, 2015, 81: 66-73.

[3] LI H T, SU J W, ZHANG Q S, et al. Mechanical performance of laminated bamboo column under axial compression[J]. Composites part B: engineering, 2015, 79: 374-382.

[4] TIAN L M, KOU Y F, HAO J P. Axial compressive behaviour of

sprayed composite mortar-original bamboo composite columns[J]. Construction and building materials,2019,215:726-736.

[5] HE M J,LI Z,SUN Y L,et al. Experimental investigations on mechanical properties and column buckling behavior of structural bamboo[J]. The structural design of tall and special buildings,2015,24(7):491-503.

[6] 肖岩,冯立,吕小红,等. 胶合竹柱轴心受压试验研究[J]. 工业建筑,2015,45(4):13-17.(XIAO Yan,FENG Li,LÜ Xiaohong,et al. Experimental studies of glubam columns under axial loads[J]. Industrial construction,2015,45(4):13-17(in Chinese)).

[7] LI H T,CHEN G,ZHANG Q S,et al. Mechanical properties of laminated bamboo lumber column under radial eccentric compression[J]. Construction and building materials,2016,121:644-652.

[8] 周靖,陈卓晟,赵卫锋,等. 带约束拉杆薄壁型钢管-竹胶板组合空芯长柱的轴压性能[J]. 应用力学学报,2018,35(3):489-495.(ZHOU Jing,CHEN Zhuosheng,ZHAO Weifeng,et al. Axial compressive performance of thin-walled steel tube/bamboo-plywood composite hollow long column with binding bars[J]. Chinese journal of applied mechanics,2018,35(3):489-495(in Chinese)).

[9] 赵卫锋,屈鹏,周靖,等. 带约束拉杆方形薄壁钢管/竹胶合板组合空芯柱轴心抗压性能[J]. 复合材料学报,2016,33(10):2325-2335.(ZHAO Weifeng,QU Peng,ZHOU Jing,et al. Axial compression behavior of square thin-walled steel tube/bamboo plywood composite hollow column with binding bars[J]. Acta materiae compositae sinica,2016,33(10):2325-2335(in Chinese)).

[10] DEHWAH H A F. Mechanical properties of self-compacting concrete incorporating quarry dust powder,silica fume or fly ash[J]. Construction and building materials,2012,26(1):547-551.

[11] SAGHAFI B,AL NAGEIM H,ATHERTON W. Mechanical behavior of a new base material containing high volumes of limestone waste dust,PFA,and APC residues[J]. Journal of materials in civil engineering,2013,25(4):450-461.

[12] KANDOLKAR S S,MANDAL J N. Behavior of reinforced stone dust walls under strip loading[J]. Advances in civil engineering materials,2015,4(1):1-31.

[13] SINGH S,NAGAR R,AGRAWAL V. A review on properties of sustainable concrete using granite dust as replacement for river sand[J]. Journal of cleaner production,2016,126:74-87.

[14] FEBIN G K,ABHIRAMI A,VINEETHA A K,et al. Strength and durability properties of quarry dust powder incorporated concrete blocks[J]. Construction and building materials,2019,228:116793.

[15] 霍曼琳,王娅丽,肖瑜,等. 采石场废弃石粉对混凝土基本性能影响的试验研究[J]. 兰州交通大学学报,2015,34(4):57-61.(HUO Manlin,WANG Yali,XIAO Yu,et al. A study on the influencing of waste stone powder produced in Quarries on concrete basic performance[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University,2015,34(4):57-61(in Chinese)).

[16] 钢铁研究总院. 金属材料 拉伸试验 第1部分:室温试验方法 GB/T 228.1—2010[S]. 北京:中国标准出版社,2011.

[17] 中国建筑科学研究院有限公司. 混凝土物理力学性能试验方法标准:GB/T 50081—2019[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2019.

[18] 刘阳,郭子雄,许鹏红,等. 核心型钢混凝土柱轴压性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2015,36(4):68-74.(LIU Yang,GUO Zixiong,XU Penghong,et al. Experimental study on axial compression behavior of core steel reinforced concrete columns[J]. Journal of building structures,2015,36(4):68-74(in Chinese)).

[19] 中国建筑西南设计研究院有限公司. 木结构设计标准:GB 50005—2017[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2017.

(编辑 黄崇亚)